

# 麦秆还田方式对旱地土壤综合温室效应的影响<sup>①</sup>

夏文斌, 张旭辉, 刘铭龙, 潘根兴, 郑聚锋\*, 李恋卿, 郑金伟

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要:** 采用静态箱-气相色谱法, 研究了秸秆还田方式对华北平原旱地玉米生长季土壤温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的影响。结果表明: 小麦秸秆不同还田方式下, 土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放动态无显著差异, 但排放量因温室气体种类而异。秸秆直接还田处理的CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O排放量分别显著高于无秸秆还田、秸秆原位焚烧、生物质炭还田处理的29.7%、17.5%、31.7%和78.1%、76.3%、114.0%; 而CH<sub>4</sub>排放量在各试验处理间无显著差异。从各处理的综合温室效应(GWP)来看, 生物质炭还田处理的GWP比秸秆直接还田处理显著降低28.7%, 而与无秸秆还田和秸秆原位焚烧处理无显著差异。考虑到作物产量变化, 进一步分析表明, 生物质炭还田处理温室气体强度(GHGI)比无秸秆还田和秸秆原位焚烧处理分别降低4.9%和14.9%, 差异不显著, 比秸秆直接还田处理显著降低36.0%。因此, 在华北平原秸秆炭化生物质炭还田具有显著的综合减排作用, 是一种土壤农田低碳生产的秸秆利用途径。

**关键词:** 秸秆还田方式; 旱地; 温室气体; 综合温室效应减排

**中图分类号:** X511

当前, 以全球变暖为主要特征的气候变化已成为各国政府关注的焦点, 而导致气候变暖的主要原因是人类活动所造成的大气温室气体浓度急剧增加<sup>[1]</sup>。其中最主要的大气温室气体是CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>。农业活动是温室气体主要的排放源之一, 其温室气体排放量占人类活动温室气体排放量的14%<sup>[2]</sup>, 其中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量分别占人类活动产生CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量的52%和84%<sup>[3]</sup>。因此, 如何通过改善农业管理措施来降低温室气体排放成为应对气候变化的重要研究内容。

秸秆作为养分和能量的载体, 是宝贵的自然资源。据估计, 在各种利用方式中我国每年有23.7%的秸秆被作为燃料, 19.4%的作物秸秆在田间直接燃烧<sup>[4]</sup>。秸秆含有多种养分, 具有较好的培肥土壤效果, 因此, 秸秆直接还田被作为农业利用的最主要途径<sup>[5]</sup>。近年来, 农作物秸秆通过热裂解转化为生物质炭在农业上的应用为秸秆农田利用提供了新途径。较多研究显示, 农田中大量使用生物质炭可以明显提高土壤质量和作物产量<sup>[6]</sup>, 并能显著降低土壤温室气体排放<sup>[7-8]</sup>, 如Zhang等<sup>[6,9]</sup>报道旱地一次使用生物质炭20 t/hm<sup>2</sup>和40 t/hm<sup>2</sup>并配施氮肥条件下, 水稻增产大约10%, 玉米增产11%~18%, N<sub>2</sub>O降低10%~

40%。但Karhu等<sup>[10]</sup>对芬兰南部农田土壤温室气体排放进行相关研究, 结果表明: 施用9 t/hm<sup>2</sup>的生物质炭对土壤N<sub>2</sub>O的排放没有明显影响。在石灰质土壤中混施肥料和生物质炭后, 大豆生物量增加, 小麦和萝卜生物量减少<sup>[11]</sup>。有关秸秆直接还田和一次性施用大量生物质炭对农田土壤温室气体排放和作物产量影响的研究, 已有较多报道<sup>[12-15]</sup>。但关于秸秆以不同形式还田对旱地温室气体排放的综合温室效应的对比研究相对较少。华北平原是中国粮食的主要产区, 其作物种植方式主要是旱作, 占全国耕地总面积的27.9%, 粮食产量占全国总产量的26.4%<sup>[16]</sup>。因此本研究针对当前我国农作物秸秆利用的主要方式, 选择北方典型旱地作为研究对象, 设置了秸秆不同还田方式的试验处理, 综合对比研究秸秆不同还田方式对土壤的温室气体排放及作物产量的影响, 以期为我国旱地作物秸秆利用方式的选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地位于河南省新乡市长公庙镇西马头王村(35°09'N, 113°51'E), 属暖温带大陆性季风气候。年平均气温14℃, 最冷月1月平均气温0.2℃, 最热月

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2013BAD11B01)、国家自然科学基金项目和江苏省高校协同创新中心项目(41371300, 41371298)资助。

\* 通讯作者(zhengjufeng@njau.edu.cn)

作者简介: 夏文斌(1990—), 男, 江西鹰潭人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体减排研究。E-mail: 764598315@qq.com

7月平均气温 27.3℃。年平均降雨 656.3 mm, 雨水集中于 6—9 月, 年均日照 2 407.7 h, 年均无霜期 200.5 天。该地区农田常年实行冬小麦—夏玉米轮作, 秸秆利用方式全部为秸秆直接还田。供试土壤为褐土, 黏粒(<0.01 mm)含量 131 g/kg, 质地为砂壤土。土壤基本性质列于表 1。

表 1 供试土壤(0~20 cm)的基本性质  
Table 1 Basic properties of topsoil (0~20cm) applied

体积质量 (g/cm <sup>3</sup> )	酸碱度 (1 : 2.5 H <sub>2</sub> O)	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
1.37	8.05	8.45	0.81	38.5	180.5

## 1.2 试验设计

试验设置 5 个处理: 对照(CK, 不施肥无秸秆还田), 无秸秆还田(NR), 秸秆直接还田(SR)(以全量小麦秸秆 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 计算, 粉碎后均匀翻入 0~20 cm 土层, 小麦秸秆粉碎 ≤15 cm), 秸秆原位焚烧(AR)(以全量小麦秸秆 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 计算, 就地焚烧, 灰分均匀翻入 0~20 cm 土层), 生物质炭还田(BR)(以全量小麦秸秆 7 500 kg/hm<sup>2</sup>, 转化率约为 1/3 计算, 炭化为生物质炭还田, 还田量为 2 500 kg/hm<sup>2</sup>, 将施入的生物质炭均匀翻入 0~20 cm 土层)。每处理设 3 次重复, 共 12 个小区, 小区采用随机区组排列, 小区面积 20 m<sup>2</sup>(4 m×5 m)。小区筑埂覆盖厚塑料膜, 用以隔水隔肥。施肥方式: 除 CK 处理不施肥外, 各处理以复合肥作基肥, 施用量分别为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 37.5 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 37.5 kg/hm<sup>2</sup>, N 225 kg/hm<sup>2</sup>, 整个生育期内不追肥。玉米种植及水分管理按照当地管理方式进行。

## 1.3 供试材料

供试玉米品种为新引 3564, 行距 60 cm, 株距 30 cm, 每个小区定植 119 株。2013 年 6 月 21 日播种, 2013 年 9 月 24 日收获。生物质炭购买于河南省三利新能源有限公司, 为小麦秸秆在 350~550℃ 高温热解后的固体产物, 其基本性质如表 2(生物质炭 C、N 含量用德国 Elementar 公司的 Elementar Vario MAX CNS Analyzer 仪测定)。

表 2 生物质炭和小麦秸秆的基本性质  
Table 2 Basic properties of biochar and wheat straw

材料	酸碱度 (1 : 2.5 H <sub>2</sub> O)	总 C (g/kg)	总 N (g/kg)	C/N	阳离子交换量 (cmol/kg)
生物质炭	9.6	486.6	10.5	46.3	24.3
小麦秸秆	-	408.7	6.33	64.5	-

## 1.4 气样采集方法

土壤温室气体采集与测定采用静态箱—气相色谱法。采样时间 2013 年 6 月 22 日至 2013 年 9 月 22

日。施肥后在每个小区中间位置安放采样底座, 底座位于植株行间, 每次采样时在底座周围的槽内进行水封。采样频率为每周 1 次, 施肥和灌溉后加密采样, 2 天 1 次, 持续 2~3 次。采样时间为上午 9:00—11:00, 在盖上采集箱后 0、10、20 和 30 min 各采样 1 次, 用 50 ml 注射性针筒采集气体样品并注入真空瓶中待测。每次观测时同时测定采样箱内温度、大气温度以及 0~10 cm 土层含水量。气样用安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890A)同时测定 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量, 详细测定条件参照 Zhang 等<sup>[6]</sup>。N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 流量根据下面公式计算:

$$F = \rho \times h \times dC/dt \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中:  $F$  为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放通量(mg/(m<sup>2</sup>·h)) 和 N<sub>2</sub>O 排放通量(μg/(m<sup>2</sup>·h));  $\rho$  为标准状态下的气体密度(mg/(m<sup>2</sup>·h));  $h$  为箱高(m);  $dC/dt$  为采样箱内的气体浓度变化率;  $T$  为采样过程中采样箱内的平均温度(℃)。

## 1.5 数据处理及统计检验

(1) 综合温室效应( $GWP$ )。100 年尺度上每千克 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 所引起的  $GWP$  分别是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍和 298 倍<sup>[1]</sup>。以 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放量转换成 CO<sub>2</sub> 当量估算  $GWP$ , 即:

$$GWP = 25 \times R_{CH_4} + 298 \times R_{N_2O} + R_{CO_2} \quad (2)$$

式中:  $GWP$  为 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放的综合温室效应(kg/hm<sup>2</sup>, 以 CO<sub>2</sub> 当量计),  $R_{CH_4}$ 、 $R_{N_2O}$  和  $R_{CO_2}$  分别为 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放总量(kg/hm<sup>2</sup>)。

(2) 温室气体强度( $GHGI$ )。计算公式为:

$$GHGI = GWP/Y \quad (3)$$

式中:  $GWP$  为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应(kg/hm<sup>2</sup>, 以 CO<sub>2</sub> 当量计),  $GHGI$  为该处理温室气体强度(kg/kg, 以 CO<sub>2</sub> 当量计),  $Y$  为玉米的产量(玉米收获后人工脱粒, 测每个小区籽粒鲜重并转化成每公顷产量, kg/hm<sup>2</sup>)。

(3) 化肥氮的 N<sub>2</sub>O 排放系数。计算公式为:

$$EF = (E_{CIN} - E_{CIN0})/N \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $EF$  是化肥氮的 N<sub>2</sub>O 排放系数(N, kg/kg),  $E_{CIN}$  和  $E_{CIN0}$  分别代表  $C_i$  水平下施氮肥处理和不施氮肥处理的 N<sub>2</sub>O 累积排放量 (N, kg/hm<sup>2</sup>),  $N$  代表当季的氮肥施用量(kg/hm<sup>2</sup>)。

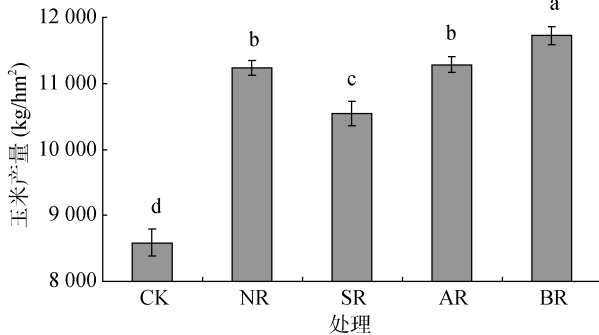
试验数据采用 Microsoft Excel 2007 进行处理, 不同处理间作物产量与温室气体排放的差异采用 JMP7 软件进行统计检验, 显著性差异水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田方式对玉米产量的影响

从图 1 中可以看出 秸秆不同还田方式与肥料施用

对玉米产量有显著影响。在 5 个不同处理中,CK 处理下玉米产量最低, NR、SR、AR 和 BR 处理玉米产量分别比 CK 处理高 31.0%、22.8%、31.5% 和 36.6%; BR 处理对玉米产量有显著正效应, 分别比 NR 和 SR 处理高 4.3% 和 11.2%, 而 SR 处理比 NR 处理低 6.2%。



(柱图上方不同小写字母表示各处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著)

图 1 不同试验处理下的玉米产量

Fig. 1 Maize yields under different treatments

## 2.2 秸秆还田方式对玉米地温室气体季节排放动态的影响

如图 2 所示, 各处理  $N_2O$  排放通量的季节性变化规律基本一致, 即施肥后第二天出现  $N_2O$  排放峰值, 且排放量主要集中在玉米苗期施肥后 10 天左右, 随后排放量下降并处于较低水平。主要原因是肥料在

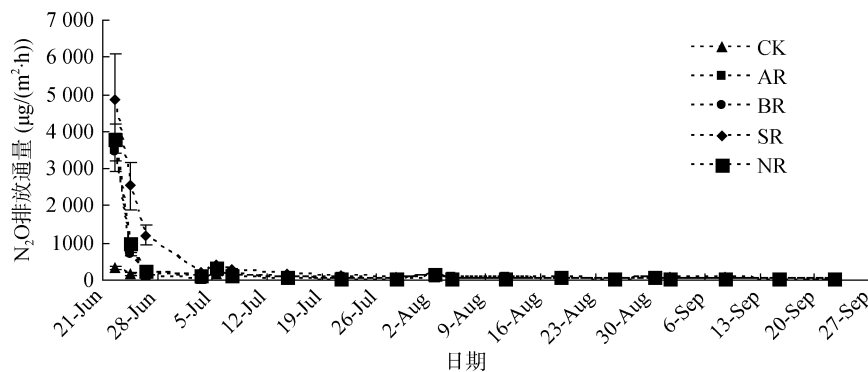


图 2 不同试验处理下  $N_2O$  排放通量的季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of  $N_2O$  fluxes under different treatments

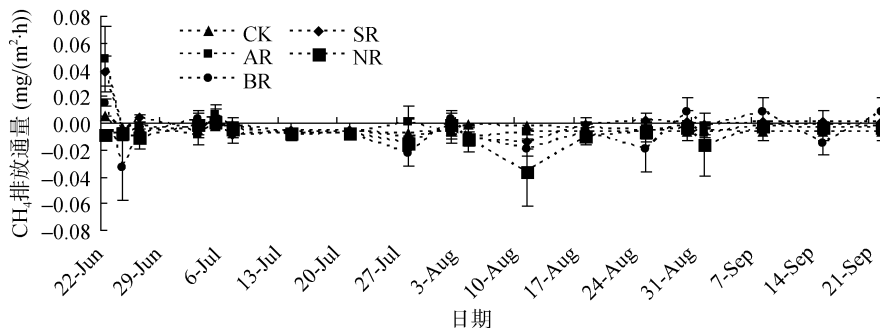


图 3 不同试验处理下  $CH_4$  排放通量的季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of  $CH_4$  fluxes under different treatments

种植初期一次性施用, 作物生长期不再追肥。此外, 各处理均在 7 月 5 日、8 月 2 日和 8 月 30 日出现了比较弱的排放峰, 这可能与 7 月 4 日的大雨以及 8 月 1 日和 8 月 29 日的灌溉有关<sup>[17]</sup>。但秸秆不同还田方式显著影响了  $N_2O$  平均排放通量, 其大小关系依次是 CK( $43.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < AR( $108.9 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < NR( $130.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < BR( $132.4 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < SR( $232.9 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ), 秸秆直接还田处理明显增加了  $N_2O$  的排放。

由图 3 可知, 总体上整个玉米生长季土壤对  $CH_4$  有弱汇的作用, 各处理间  $CH_4$  排放无显著差异。

从图 4 中可以看出, 整个生育期内各处理的  $CO_2$  排放动态变化规律趋势一致, 且整个观测期内出现多个排放峰, 与  $N_2O$  和  $CH_4$  的季节性动态变化规律不同, 这一差异可能与试验地土壤翻耕、降水变化以及温度变化有关<sup>[18-19]</sup>。不同秸秆还田方式处理  $CO_2$  平均排放通量存在较大差异, 其大小关系依次是 CK( $98.4 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < NR( $115.4 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < BR( $117.1 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < AR( $131.2 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) < SR( $154.1 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ), 由此可见, 不同处理投入的有机碳量与碳形态显著影响了土壤  $CO_2$  的呼吸排放。

## 2.3 秸秆还田方式对玉米季土壤综合温室效应与温室气体强度的影响

表 3 是不同试验处理下的温室气体排放量及  $N_2O$  排放系数。由表 3 可知, 不同处理间土壤温室气

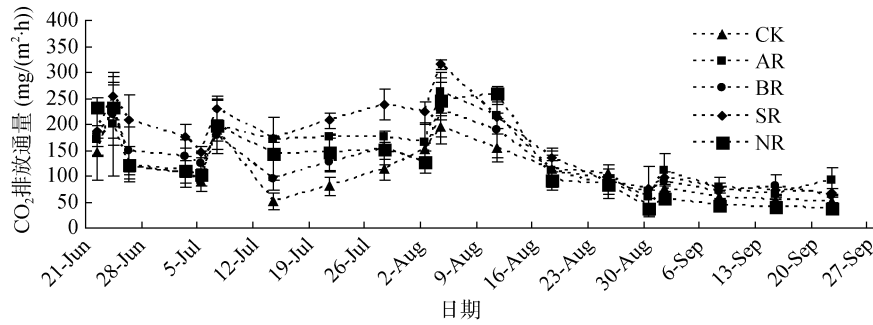


图 4 不同试验处理下 CO<sub>2</sub> 排放通量动态变化  
Fig. 4 Seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes under different treatments

体的累积排放量存在显著差异。NR、SR、AR 和 BR 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别是 CK 处理的 3.04、5.42、3.08 和 2.54 倍。相比 NR 处理，AR 和 BR 处理 N<sub>2</sub>O 累积排放量无显著差异，而 SR 处理显著增加了 78.3%。从 N<sub>2</sub>O 排放系数来看，SR 处理 N<sub>2</sub>O 排放系数最高，显著高于其他处理 53.0%~65.3%，而其他各处理间无显著差异。从 CO<sub>2</sub> 排放量来看，相对于 CK 处理，SR 和 AR 处理 CO<sub>2</sub> 的累积排放量分别增加 56.7% 和 33.4%，而 NR 和 BR 处理分别增加 17.3% 和 19.0%；与 NR 处理相比，SR 处理显著增加 33.6%，AR 和 BR 处理 CO<sub>2</sub> 的累积排放量与 NR 处理间无显著差异。秸秆不同还田方式对各处理 CH<sub>4</sub> 的累积排

放量无显著影响。

通过对 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 综合温室效应(GWP)分析可以看出，CK 处理的 GWP 最低，大幅低于施肥处理。在秸秆不同还田处理中，BR 和 AR 处理的 GWP 与 NR 处理无显著差异，而 SR 处理的 GWP 比 NR 处理显著增加 39.3%。将综合温室效应与作物产量结合起来，可以看出(表 4)，与 CK 处理相比，NR、AR 和 BR 处理 GHGI 均无显著性差异，而 SR 处理的 GHGI 显著高于其他处理；在 3 种秸秆还田方式处理中，BR 处理 GHGI 最低，比 AR 处理低 14.9%，但差异不显著，比 SR 处理低 36.0%，降幅达显著水平。

表 3 秸秆不同还田方式 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 累积排放量及 N<sub>2</sub>O 排放系数  
Table 3 Cumulative emissions of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions factor under different wheat-straw-return ways

处理	N <sub>2</sub> O 累积排放量 (N, kg/hm <sup>2</sup> )	CH <sub>4</sub> 累积排放量 (C, kg/hm <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> 累积排放量 (C, kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O 排放系数 (%)
CK	0.96 ± 0.10 c	-0.12 ± 0.09 a	2 195.6 ± 36.8 c	-
NR	2.92 ± 0.10 b	-0.18 ± 0.05 a	2 575.8 ± 219.1 bc	0.87 ± 0.05 b
SR	5.20 ± 0.75 a	-0.07 ± 0.08 a	3 440.4 ± 197.2 a	1.88 ± 0.33 a
AR	2.95 ± 0.13 b	-0.09 ± 0.06 a	2 929.1 ± 309.0 ab	0.89 ± 0.06 b
BR	2.43 ± 0.11 b	-0.13 ± 0.08 a	2 612.6 ± 419.7 bc	0.65 ± 0.05 b

注：同列不同小写字母表示处理间差异在 P<0.05 水平显著。下同。

表 4 秸秆不同还田方式下综合温室效应(GWP)及温室气体强度(GHGI)

Table 4 Global warming potentials and greenhouse gas intensities under different wheat-straw-return ways

处理	产量(kg/hm <sup>2</sup> )	GWP(kg/hm <sup>2</sup> )	GHGI(kg/hm <sup>2</sup> )
CK	8 583.3 ± 208.2 d	8 495.6 ± 84.2 c	0.977 ± 0.002 b
NR	11 241.7 ± 112.7 b	10 803.6 ± 789.8 b	0.961 ± 0.063 b
SR	10 541.7 ± 187.6 c	15 047.4 ± 369.9 a	1.429 ± 0.071 a
AR	11 283.3 ± 123.3 b	12 120.6 ± 1174.0 b	1.074 ± 0.093 b
BR	11 725.0 ± 139.2 a	10 731.5 ± 1501.3 b	0.914 ± 0.131 b

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田方式对玉米产量的影响

农作物秸秆处理与还田是当前农业废弃物资源

化研究的重要内容。秸秆含有丰富的养分，可改善土壤肥力水平。已有研究表明，秸秆还田对作物产量有明显影响，但结果报道不一，其影响程度与秸秆还田方式、还田量、以及肥料施用有关。李勇等<sup>[13]</sup>对太湖流域稻-麦轮作系统研究发现，当施氮量为 270 kg/hm<sup>2</sup>时，小麦秸秆全量还田比不还田增产 5.3%；赵鹏和陈阜<sup>[20]</sup>在河南采用秸秆还田配施氮肥对小麦产量的研究表明，秸秆全量(7 500 kg/hm<sup>2</sup>)还田配施氮肥用量为 90、180、270 和 360 kg/hm<sup>2</sup> 时比单施同量氮肥分别增产 7.1%、8.4%、11.1% 和 10.2%；江晓东等<sup>[21]</sup>报道在高产条件下无论是常规施肥(麦季施氮 240 kg/hm<sup>2</sup>，玉米季施氮 112.5 kg/hm<sup>2</sup>)还是减施氮肥(麦季施氮

168 kg/hm<sup>2</sup>, 玉米季施氮 112.5 kg/hm<sup>2</sup>), 秸秆全量还田较不还田处理小麦和玉米产量均无显著影响, 而李录久等<sup>[22]</sup>采用麦秆还田量为 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 和 6 000 kg/hm<sup>2</sup> 时, 当季小麦产量较秸秆不还田分别减少 7.2% 和 4.0%。而本研究中, 秸秆还田处理下的玉米产量比无秸秆还田(仅施化肥)处理低 6.2%, 其原因可能是因为秸秆还田量过多(还田量为 7 500 kg/hm<sup>2</sup>), 从而影响了玉米苗期扎根, 尤其是在高温条件下, 降低了其对养分和水分的吸收能力; 而秸秆生物质还田下玉米产量显著高于其他还田方式。Zhang 等<sup>[6]</sup>也有类似的报道, 在稻田与旱地土壤中施用不同用量(20 t/hm<sup>2</sup> 和 40 t/hm<sup>2</sup>) 生物质炭对作物产量的研究也显示, 水稻和玉米产量分别增加 9% ~ 14% 和 7% ~ 18%。而唐光木等<sup>[23]</sup>在新疆荒漠土的结果表明, 生物质炭施用对玉米有 2% ~ 4% 的增产效应, 这主要是与生物质炭的特性有关, 作为疏松多孔的介质, 秸秆以生物质炭还田具有较好的保水性能<sup>[24]</sup>。在干旱条件下, 短时期内可较好缓解干旱对作物的水分胁迫(本试验地在七月中旬以后持续 40 天左右的高温无雨天气, 可能是生物质炭还田处理玉米产量增加的原因)。其次, 生物质炭含有较多的芳环结构和羟基、羧基等基团, 施入土壤后显著增加了土壤中离子交换点位, 从而增加土壤阳离子交换量, 对养分起到了保持和缓释的作用<sup>[25-26]</sup>。此外, 生物质炭有利于促进玉米对氮、磷、钾等养分的吸收, 尤其是对钾的吸收<sup>[27]</sup>。

### 3.2 秸秆还田方式对土壤温室气体排放及综合温室效应的影响

秸秆还田对农田土壤温室气体排放已有较多研究。大量研究结果显示, 秸秆还田对农田 CO<sub>2</sub> 排放具有显著促进作用。强学彩等<sup>[28]</sup>对玉米季、小麦季 3 种不同秸秆还田量的土壤呼吸测定结果显示, 随着秸秆还田量的增加土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加; 张庆忠等<sup>[29]</sup>对华北平原冬小麦-玉米轮作系统的研究表明, 施氮水平为 200 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦秸秆全量还田较不还田处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加 9.6%。本试验结果也显示, SR 处理的 CO<sub>2</sub> 累积排放量较 NR 处理增加了 33.6%。这是因为秸秆在土壤中降解过程中, 有机碳多以 CO<sub>2</sub> 形式在土壤中释放, 但秸秆的分解程度与水管理、耕作及施肥管理措施有关。而 BR 处理与 NR 和 AR 处理 CO<sub>2</sub> 累积排放量无显著差异, 与 Cross 和 Sohi<sup>[30]</sup>在土壤中添加生物质炭发现土壤有机碳降解没有产生明显的激发效应的结果相似。由此可见, 生物质炭本身有较强的生物稳定性, 在还田后对原有土壤有机碳降解也没有明显的促进作用。

秸秆还田对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响报道不一。由于水田与旱地的利用方式存在很大差异, 秸秆还田对两种土地利用方式下 N<sub>2</sub>O 排放的影响可能存在差异。邹建文等<sup>[31]</sup>对南京稻-麦轮作系统的研究发现, 在水稻生长季常规灌溉方式(淹水和烤田相结合)下, 秸秆还田减少后季麦田 N<sub>2</sub>O 的排放; 而在水稻生长季采用持续淹水方式, 施用秸秆并不减少 N<sub>2</sub>O 排放量。而马二登等<sup>[32]</sup>报道稻秆表面覆盖显著增加麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放量。本研究是秸秆在旱作条件下的还田, 图 2 表明, 处理 N<sub>2</sub>O 排放差异主要体现在灌溉之后短暂时间内, 因此, 秸秆直接还田处理下 N<sub>2</sub>O 排放量显著高于无秸秆还田处理, 可能主要是由于施肥后灌水量较大, 土壤含水量较高, 此时可能反硝化作用增强, 秸秆的施入增加了碳的供应, 促进了这一作用, 从而增加了 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[33]</sup>。施用生物质炭作为一种新型温室气体减排措施, 近年来引起广泛关注<sup>[34-35]</sup>。Zhang 等<sup>[6]</sup>研究了水稻田温室气体排放中指出, 生物质炭能够显著降低 N<sub>2</sub>O 的排放。Liu 等<sup>[15]</sup>在 3 种不同土壤类型下也做出了类似的结果。本研究也证明了在旱地土壤上生物质炭的添加降低了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放, 本试验中, 秸秆生物质炭还田比秸秆直接还田处理的土壤 N<sub>2</sub>O 排放显著降低 53.2%。黄耀等<sup>[36]</sup>研究认为在相同施肥水平下, 土壤因素代替氮源成为影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要因子。生物质炭的施用降低了 N<sub>2</sub>O 排放主要是由于生物质炭提高了土壤的阳离子交换量<sup>[37]</sup>, 增加了土壤对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的吸附, 使得土壤溶液中无机氮减少抑制了土壤硝化过程的进行<sup>[38-40]</sup>。

GHGI 由 GWP 和玉米产量综合决定。由于旱地 CH<sub>4</sub> 无明显排放, 且各处理间无显著差异, 因此秸秆不同还田方式对 GWP 的影响主要体现在 N<sub>2</sub>O 产生的温室效应上。本研究中, 以秸秆生物质炭还田方式下的 GHGI 显著低于秸秆焚烧还田和秸秆直接还田方式, 即以秸秆生物质还田方式可显著降低作物单位产量的温室效应, Zhang 等<sup>[9]</sup>在玉米季一次大量施用生物质炭后的温室气体强度可降低 23% ~ 47%, 由此可见, 秸秆生物质炭还田可作为农田作物低碳生产的可行途径。

## 4 结论

秸秆还田方式对旱地作物产量影响显著。3 种还田方式中, 以生物质炭还田下的玉米产量最高, 分别比原位焚烧和秸秆直接还田高 3.9% 和 11.2%。

秸秆还田方式显著影响旱地土壤温室气体排放, 秸秆直接还田明显促进土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量, 秸秆原位焚烧无显著影响, 而秸秆生物质炭还田显著降

低  $N_2O$  排放，还田方式对旱地土壤  $CH_4$  排放无显著影响。

秸秆还田方式显著改变农田土壤的综合温室效应(*GWP*)和温室气体强度(*GHGI*)，秸秆直接还田产生的 *GWP* 和 *GHGI* 最高，秸秆原位焚烧次之，而秸秆生物质炭还田方式最低，因此，秸秆以生物质炭方式还田具有显著综合减排效应，是一种低碳的生产途径。

#### 参考文献：

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [2] 吕镇梅, 闵航, 陈中云, 吕琴. 水稻田土壤甲烷厌氧氧化在整个甲烷氧化中的贡献率[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 13-17
- [3] Sass RL, Fisher FM, Harcombe PA, Turner FT. Mitigation of methane emissions from rice fields: Possible adverse effects of incorporated rice straw[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1991, 5(3): 275-287
- [4] Yan X, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(27): 5 262-5 273
- [5] 钟杭, 朱海平, 黄锦法. 稻麦秸秆全量还田对作物产量和土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2002, 14(6): 344-347
- [6] Zhang AF, Cui LQ, Pan GX, Li LQ, Zhang XH, Zheng JW. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 469-475
- [7] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2 459-2 463
- [8] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 施用生物质炭后稻田土壤性质, 水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4 844-4 853
- [9] Zhang AF, Bian RJ, Pan GX, Cui LQ, Li LQ, Zheng JW, Zheng JF, Zhang XH. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153-160
- [10] Karhu K, Mattilab T, Bergströma I, Regina K. Biochar addition to agricultural soil increased  $CH_4$  uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2011, 140: 309-313
- [11] Zwieter LV, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327: 235-246
- [12] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 牟玉静, 伦小秀. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 407-414
- [13] 李勇, 曹红娣, 邓九胜, 朱荣松, 白洁瑞, 周航. 小麦秸秆全量还田对土壤速效氮及水稻产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 46-51
- [14] Liu XY, Qu JJ, Li LQ, Zhang AF, Zheng JF, Zheng JW, Pan GX. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress  $N_2O$  emission in rice paddies?—A cross site field experiment from South China[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 168-173
- [15] Liu YX, Yang M, Wu YM, Wang HL, Chen YX, Wu WX. Reducing  $CH_4$  and  $CO_2$  emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930-939
- [16] 于静洁, 任鸿遵. 华北地区粮食生产与水供应情势分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 360-365
- [17] 邹建文, 黄耀. 农业管理措施对  $N_2O$  排放的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 46-49
- [18] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田  $CH_4$  和  $CO_2$  排放通量的影响初探[J]. 中国农业气象, 2004, 25(3): 8-10
- [19] 贾金生, 李俊, 张永强. 夏玉米生长盛期农田土壤  $CO_2$  排放的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 1-4
- [20] 赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1 014-1 018
- [21] 江晓东, 迟淑筠, 宁堂原, 李增嘉. 秸秆还田与施氮量对小麦、玉米产量与品质的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 1(2): 44-47
- [22] 李录久, 杨哲峰, 李文高, 徐志斌, 胡永年, 苗春苗, 肖凤体. 秸秆直接还田对当季作物产量效应[J]. 安徽农业科学, 2000, 28(4): 450-457
- [23] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 王西和, 郑金伟, 李恋卿, 潘根兴. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1 797-1 802
- [24] 陈静, 李恋卿, 郑金伟, 潘根兴, 张旭辉, 郑聚锋. 生物质炭保水剂的吸水性能研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 232-237
- [25] Laird DA. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1): 178-181
- [26] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, Enders A, Hyland C, Riha S. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system[J]. Plant and soil, 2013, 365(1/2): 239-254
- [27] 刘世杰, 窦森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 79-82
- [28] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤  $CO_2$  释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469-472
- [29] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 周中仁, 陈淑峰. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2 883-2 887
- [30] Cross A, Sohi SP. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter

- status[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10): 2 127–2 134
- [31] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 蒋静艳, 郑循华, 王跃思. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田  $N_2O$  排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(4): 409–414
- [32] 马二登, 马静, 徐华, 曹金留, 蔡祖聪, 八木一行. 稻秆还田方式对麦田  $N_2O$  排放的影响[J]. *土壤*, 2007 (6): 870–873
- [33] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 杨晓棠, 刘学军, 潘家荣. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2001, 3(6): 47–50
- [34] Singh BP, Hatton BJ, Singh B, Cowie A, Kathuria A. Influence of biochar on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1 224–1 235
- [35] Zwieter LV, Singh B, Joseph S, kimber S, Cowie A, Chan YK. Biochar and emissions of non- $CO_2$  greenhouse gases from soil[J]. *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan, London, 2009: 227–249
- [36] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 周权锁, Sass RL. 氮肥水平对不同土壤  $N_2O$  排放的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2 094–2 098
- [37] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 张庆忠. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2 930–2 934
- [38] Wang JY, Zhang M, Xiong ZQ, Liu PL, Pan GX. Effects of biochar addition on  $N_2O$  and  $CO_2$  emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8): 887–896
- [39] Taghizadeh-Toosi A, Clough TJ, Sherlock RR, Condon LM. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 57–69
- [40] Spokas KA, Novak JM, Venterea RT. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 35–42

## Effects of Wheat Straw Return Ways on Integrated Global Warming Effect from Dryland Soil in North China Plain

XIA Wen-bin, ZHANG Xu-hui, LIU Ming-long, PAN Gen-xing,  
ZHENG Ju-feng\*, LI Lian-qing, ZHENG Jin-wei

(*Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

**Abstract:** A field experiment was conducted to investigate the effect of wheat straw return ways on maize production and greenhouse gases (GHGs) mitigation in North China Plain. GHGs emission was measured using static-chamber gas chromatography method. Five treatments were established, including CK (no chemical fertilizer+no straw as control), NR (chemical fertilizer+no straw), SR (chemical fertilizer+straw), AR (chemical fertilizer+straw as ash), BR (chemical fertilizer+straw as biochar). The results showed there was no significant change in the dynamics of greenhouse gases emission from soil among different treatments, but significant in the amount of emission, which was related to types of greenhouse gases. The amount of  $CO_2$  emission in the treatment of SR increased by 29.7%, 17.5% and 31.7% compared to the treatment of NR, AR and BR, and the amount of  $NO_2$  emission in the treatment of SR increased by 78.1%, 76.3% and 114.0% compared to the treatment of NR, AR and BR, respectively, but there was no significant difference in the amount of  $CH_4$  emission among the all treatments. The *GWP* was decreased by 28.7% in the BR treatment than that in the SR treatment, but no difference among the BR, NR and AR treatment. Considering the result of corn yield into account, the *GHGI* was decreased by 4.9% and 14.9% for the treatment of BR than the treatments of NR and AR, and significantly was decreased by 36% for the treatment of BR than the treatment of SR. Therefore, the conversion of crop straw to biochar as an addition to dryland could be an effect way of increasing maize yield and mitigating climate change.

**Key words:** Straw return ways, Dryland, Greenhouse gases, Integrated greenhouse effect mitigation